Niet-lineaire versterkers

Naast de lineaire versterker, waarvan de uitgangsspanning een bepaalde constante factor groter is dan de ingangsspanning, bestaan er ook niet-lineaire versterkers, waar dit verband niet zo eenvoudig is. Bekende voorbeelden zijn de logaritmische en de exponentiële versterker.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 23-12-2018

Soorten van versterkers

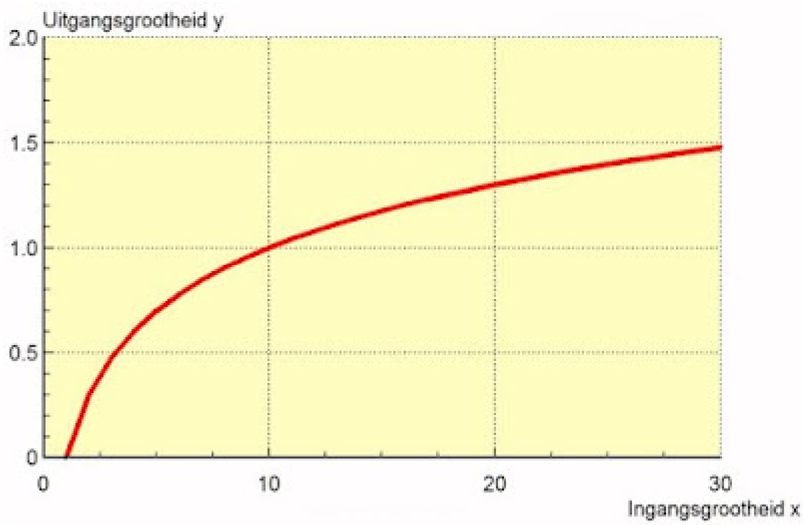
Lineair contra niet-lineair
Iedereen die zegt dat hij of zij een versterkertje gaat maken is in feite erg onnauwkeurig. Want wat voor soort versterker gaat er gebouwd worden? Afgezien van het feit dat zo'n schakeling een spanning- of stroomversterker kan zijn, inverterend of niet-inverterend kan werken, hoog- of laagimpedante in- en uitgangen kan hebben, is er een veel fundamentelere vraag aan de orde. De meest fundamentele eigenschap van een versterker is namelijk het gegeven of de schakeling lineair of niet-lineair werkt. In de praktijk is het echter zo vanzelfsprekend dat een versterker lineair werkt, dat iedereen bij de opmerking *'een versterkertje bouwen'* aan een lineaire schakeling denkt. Niet-lineaire versterkers worden namelijk niet zo vaak gebruikt, dit ondanks het feit dat er toch talrijke nuttige toepassingen voor te verzinnen zijn.

De lineaire versterker
De belangrijkste eigenschap van de lineaire versterker kan het best worden toegelicht aan de hand van de *'transfer-karakteristiek'*, de grafiek die het verband geeft tussen de ingangsgrootheid x en de uitgangsgrootheid y. In de onderstaande figuur is deze karakteristiek getekend voor een lineaire versterker. Hieruit blijkt dat het verband tussen x en y lineair is, hetgeen volgt uit de rechte lijn. Als bij een waarde x = 10 een waarde y = 30 hoort, dan zal bij een waarde x = 20 een waarde y = 60 horen en niets anders! Of, met andere woorden, de versterkingsfactor A van de schakeling is constant voor het gehele bereik van de ingangsgrootheid x. Dat wordt uitgedrukt door de formule:
$y = A \bullet x$
waarmee de lineariteit meteen wiskundig bewezen is.
Op een bepaald moment gaat het lineaire verband uiteraard niet meer op. Als u de ingang x verder laat stijgen zal de uitgang y niet meer stijgen. Men zegt dat de lineaire versterker vastloopt tegen de voedingsspanningen. De uitgang y kan immers niet groter worden dan de grenzen die door de beschikbare voedingsspanning(en) worden gesteld.
Het zal nu wel duidelijk zijn waarom de meeste versterkers lineair werken. In de meeste gevallen doet de ontwerper zelfs alle mogelijke moeite om de lineariteit van de schakeling zo ver mogelijk op te voeren. Iedere afwijking van de rechte lijn brengt immers harmonische vervorming met zich mee, een verschijnsel waar u in de meeste versterkers absoluut geen behoefte aan hebt.



De transfer-karakteristiek van een lineaire versterker. (© 2018 Jos Verstraten)

De logaritmische versterker
In de onderstaande figuur is een transfer-karakteristiek getekend, die absoluut niet-lineair is. Bij deze versterker kun u niet stellen dat, als de waarde van ingang x verdubbelt, automatisch de waarde van de uitgang y ook verdubbelt! Een versterker die een dergelijke karakteristiek heeft noemt men een niet-lineaire versterker. In dit specifieke geval wordt het wiskundige verband tussen in- en uitgang gegeven door de formule:
y = A ● [ln x]
De uitgangsgrootheid y is dus gelijk aan het product van een constante factor A en de logaritme van de ingangsgrootheid x. Vandaar dat een niet-lineaire versterker met de getekende karakteristiek een logaritmische versterker wordt genoemd. Naarmate de ingangsgrootheid x stijgt, zal de schakeling steeds minder gaan versterken. De totale versterking van de schakeling is dus afhankelijk van de waarde van de ingangsgrootheid x.



De transfer-karakteristiek van een logaritmische versterker. (© 2018 Jos Verstraten)

De exponentiële versterker
Een andere niet-lineaire versterker is de zogenoemde exponentiële versterker. De transfer-karakteristiek van een dergelijke schakeling is getekend in de onderstaande figuur. Nu blijkt dat de totale versterkingsfactor van de schakeling stijgt naarmate de ingangsgrootheid x toeneemt. U kunt dus stellen dat een exponentiële versterker een niet-lineaire versterker is, die tegengesteld werkt dan een logaritmische versterker. Vandaar dat deze schakeling ook we eens de anti-log versterker wordt genoemd. De algemene wiskundige voorstelling van een dergelijke schakeling is:
y = A ● [exp x]



De transfer-karakteristiek van een exponentiële versterker. (© 2018 Jos Verstraten)

Toepassingen van niet-lineaire versterkers
Als u de twee niet-lineaire karakteristieken even goed bekijkt, dan denkt u waarschijnlijk onmiddellijk aan twee elektronische begrippen: *'comprimeren'* en *'expanderen'*.
Inderdaad is een logaritmische versterker een ideale schakeling voor het opbouwen van een compressor. Een compressor is een schakeling met als het ware een automatische versterkingsregeling. Naarmate de ingangsspanning stijgt gaat de schakeling steeds minder versterken, zodat de uitgang van de versterker niet overstuurd kan worden. Er zijn tal van toepassingen te verzinnen voor een dergelijke schakeling, zeker in de audiotechniek waar u steeds alert moet zijn op het oversturen van schakelingen.
De exponentiële versterker is als het ware geschapen voor het realiseren van expanders. Dat zijn schakelingen die meer gaan versterken naarmate de ingangsspanning stijgt. Met een expander kunt u het door een compressor 'in elkaar geperste' signaal weer tot normale proporties terugbrengen.

Het begrip decibel
Maar er is nog een ander zeer belangrijk toepassingsterrein voor logaritmische versterkers. Als u in de audiotechniek signaalniveaus met elkaar wilt vergelijken doet u dat meestal met de grootheid dB. De decibel is niets anders dan de logaritmische verhouding van twee spanningen. In formule:
$U_{dB} = 20 \bullet \ln [U_1 / U_2]$
Vandaar dan ook dat dB-meters of VU-meters geen lineaire schaal hebben, maar een logaritmische. In de onderstaande figuur is als voorbeeld de bekende VU-meter getekend, die vroeger op iedere geluidsopname-apparaat aanwezig was. Het totale meetbereik van -20 dB tot +3 dB is niet lineair over de schaal verdeeld, maar logaritmisch. Het gebied van 0 dB tot +3 dB neemt net zo veel plaats in beslag als het drie keer grotere gebied van -10 dB tot -20 dB. Het gevolg is dat u een niveauverschil van -19 dB naar -18 dB nauwelijks ziet, terwijl hetzelfde absolute verschil van +2 dB naar +3 dB heel duidelijk opvalt. In professionele installaties neemt men echter geen genoegen met zo'n knullig schaaltje, maar wilt men een lineaire dB-schaal hebben. Om zo'n schaal te maken zal men een beroep moeten doen op een logaritmische versterker. Ook als u een digitale dB-meter wilt maken zult u een zeer goede logaritmische versterker moeten inschakelen om de schaal te lineariseren.

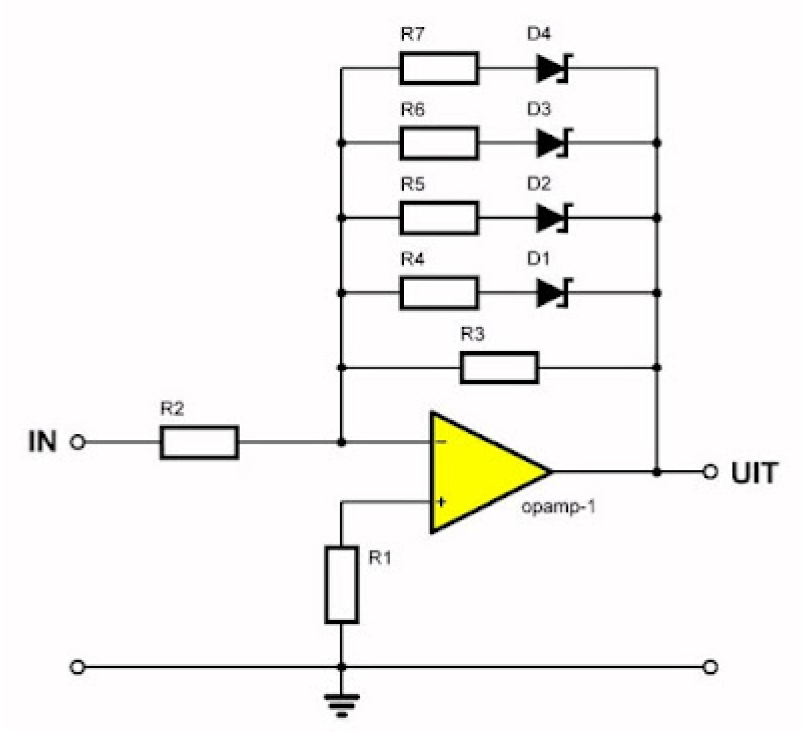


Opmerking
Een exponentiële versterker kunt u maken door een logaritmische versterker in de terugkoppellus van een op-amp op te nemen. Men noemt dat de anti-log schakeling of LOG^{-1} schakeling, waarvan de transfer-karakteristiek veel gelijkenis vertoont met deze van de exponentiële versterker. Vandaar dat in de rest van dit artikel alleen het principe, de werking en de praktische schakelingen van logaritmische versterkers worden besproken.

De pseudo-logaritmische versterker

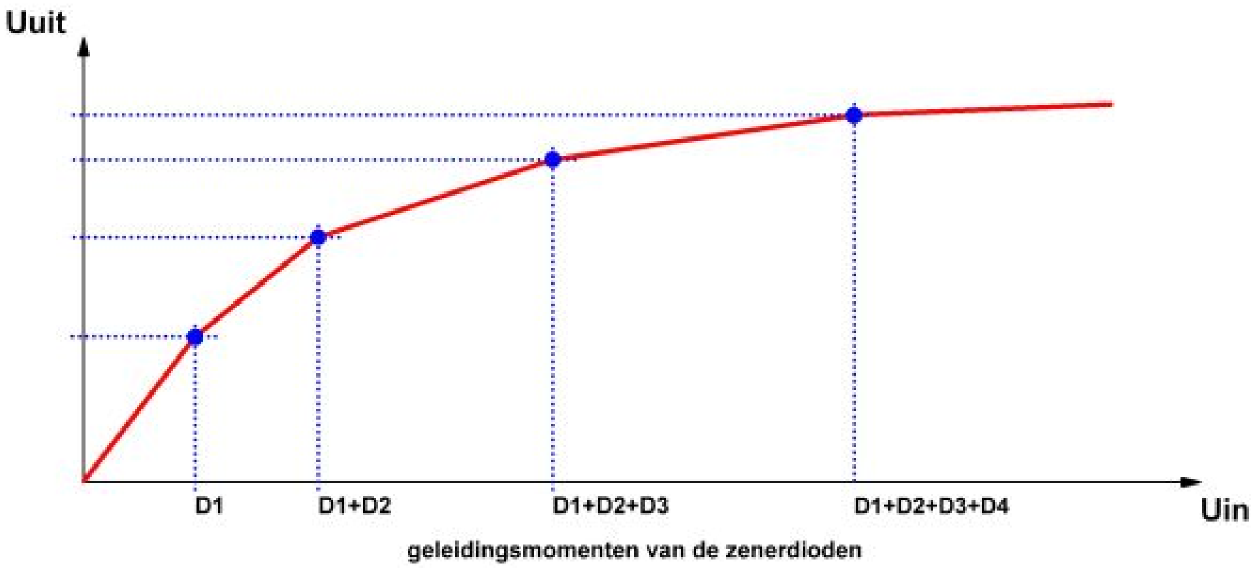
Inleiding
Versterkers die echt logaritmisch werken zijn, zo zal later blijken, wel eenvoudig te bouwen, maar niet zo eenvoudig te handhaven. De noodzakelijke schakelingen zijn namelijk extreem temperatuur gevoelig en de meeste ontwerpkunde moet u besteden aan het binnen de perken houden van het verloop van de eigenschappen onder invloed van de omgevingstemperatuur. Vandaar dat in eenvoudige schakelingen wordt gewerkt met een transfer-karakteristiek die het ideale wiskundige verloop benadert. Men noemt deze schakelingen *'pseudo-logaritmisch'* en vanwege de eenvoud zullen deze als eerste besproken worden.

De zener teruggekoppelde op-amp
De allereenvoudigste, maar ook minst nauwkeurige pseudo-logaritmische versterker maakt gebruik van zenerdioden in de terugkoppeling van een operationele versterker. Het basisschema van een dergelijke schakeling is getekend in onderstaande figuur. Door de zenerdioden in de terugkoppeling op te nemen wordt de versterkingsfactor van de schakeling afhankelijk van de grootte van de uitgangsspanning en dus ook van de ingangsspanning. Is de uitgangsspanning lager dan de doorslagspanning van de zeners, dan wordt de versterking van de schakeling bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R2 en R3. De versterking is dan vrij hoog, zodat de transfer-karakteristiek steil verloopt. Stijgt de uitgangsspanning, dan gaat de zener D1 doorslaan, met als gevolg dat de weerstand R4 parallel komt te staan aan de weerstand R3. De versterkingsfactor gaat dalen, zodat de transfer-karakteristiek iets vlakker gaat verlopen. Stijgt de uitgangsspanning nog meer, dan gaat ook de zener D2 doorslaan en komt
R5 parallel te staan aan R3 en R4. De versterking daalt nog meer, de karakteristiek verloopt nog vlakker. Naarmate meer en meer zeners doorslaan komen er meer en meer weerstanden parallel te staan aan R3 en zal de versterking van de trap meer en meer dalen.



De basisschakeling van een zener teruggekoppelde logaritmische versterker. (© 2018 Jos Verstraten)

De transfer-karakteristiek
De transfer-karakteristiek van de schakeling verloopt getrapt, zoals voorgesteld in onderstaande figuur. De karakteristiek is dus een benadering van de ideale wiskundige logaritmische karakteristiek.

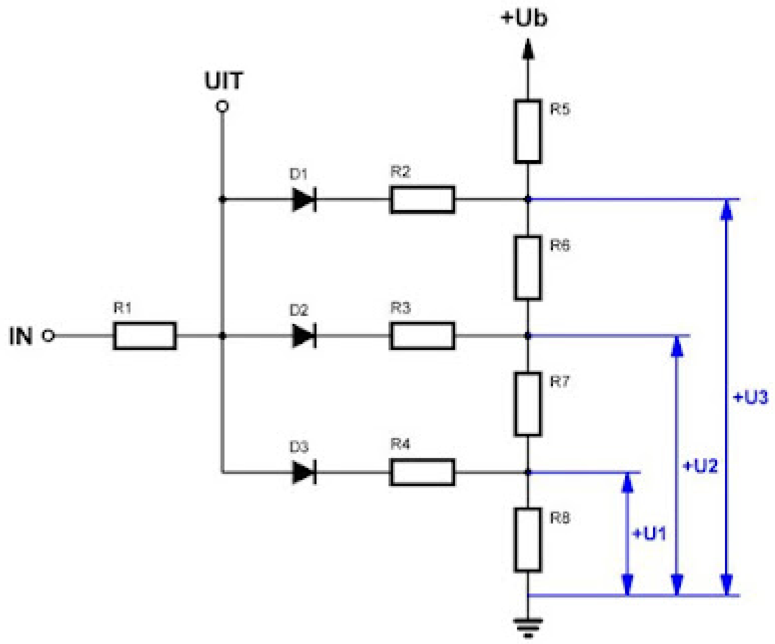


De transfer-karakteristiek van de zener-schakeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Voor- en nadelen
Het grote nadeel van deze eenvoudige schakeling is dat u erg weinig invloed hebt op de plaats van de knikpunten in de karakteristiek. U hebt immers maar een beperkte keuze in de doorslagspanningen van zenerdioden! Vandaar dat het met een dergelijke schakeling niet mogelijk is de ideale karakteristiek zeer precies na te maken.

De diode teruggekoppelde op-amp
Het bezwaar van de niet met iedere gewenste doorslagspanning te verkrijgen zenerdioden kan opgelost worden door de zeners kunstmatig na te maken met gewone silicium dioden. Het principe van deze techniek is getekend in de onderstaande figuur. Tussen de in- en de uitgang is een vaste weerstand R1 opgenomen. Tussen de positieve voeding en de massa

staat een spanningsdeler R5 tot en met R8. Ieder knooppunt van deze deler is via een serieschakeling van een diode en een weerstand met de uitgang verbonden. Er ontstaat een spanningsafhankelijke verzwakker, waarvan de verzwakking stijgt naarmate de ingangsspanning toeneemt. De dioden gaan immers een na een geleiden op het moment dat de positieve ingangsspanning groter wordt dan diodespanning plus respectievelijk de spanningen +U1, +U2 en +U3. Als de dioden geleiden worden de weerstanden R4 tot en met R2 via de laagohmige spanningsdeler naar de massa geschakeld. Er ontstaat dan een weerstandsdeler tussen enerzijds de vaste weerstand R1 en anderzijds de steeds lager worden vervangingsweerstand van het diode/weerstand-netwerk naar de massa. Op deze manier kunt u een logaritmische curve namaken. U hebt immers niet alleen volledige vrijheid wat betreft de waarden van de weerstanden R2, R3 en R4, maar ook wat betreft de spanningsdrempels +U1, +U2 en +U3.



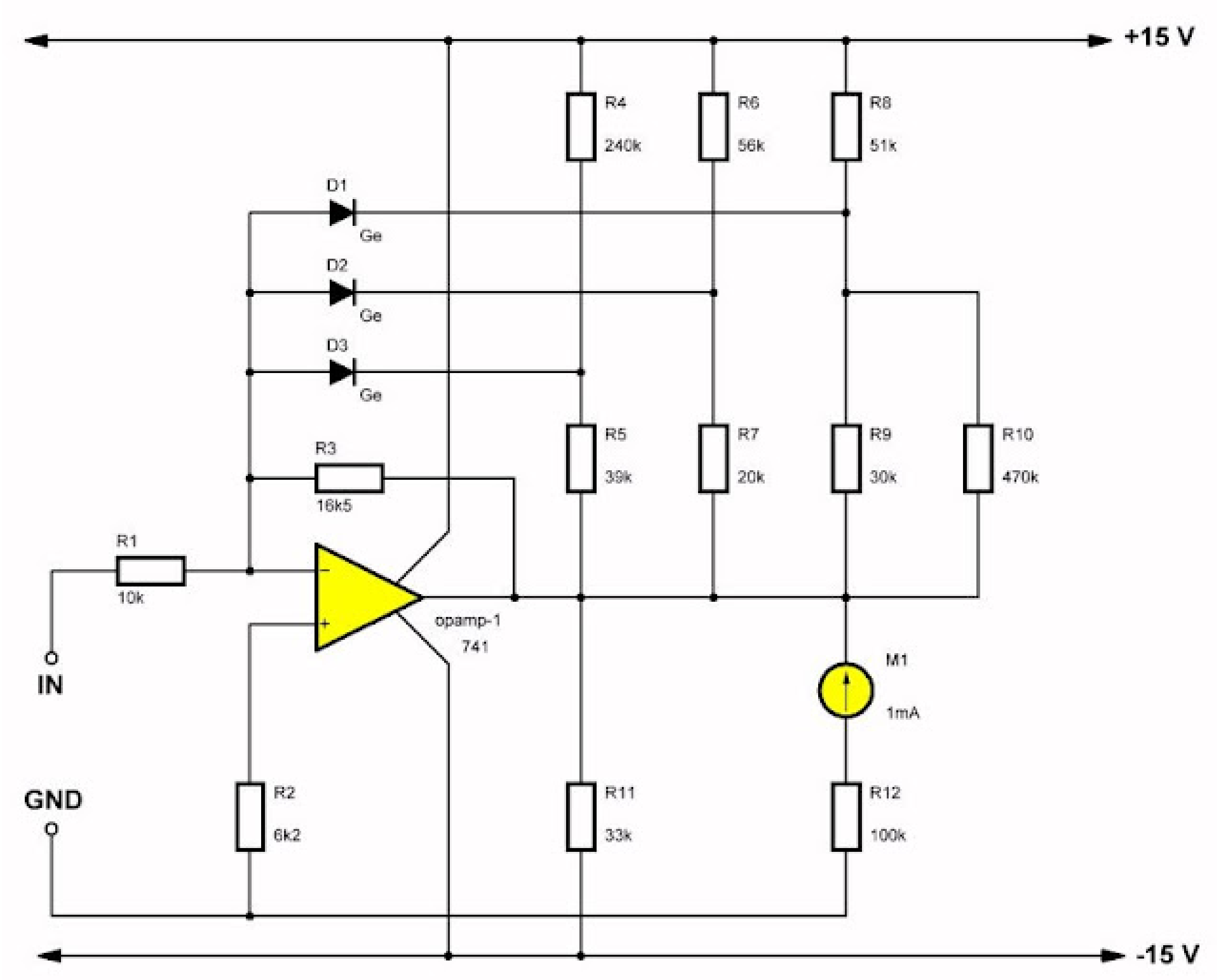
Het principe van de nagemaakte zeners met silicium dioden en weerstanden. (© 2018 Jos Verstraten)

De transfer-karakteristiek

De schakeling heeft een transfer-karakteristiek die volledig identiek van vorm is als deze die getekend is in een van de vorige figuren. Maar het is nu mogelijk zowel de helling van de segmenten als de breekpunten van de karakteristiek zeer nauwkeurig te berekenen.

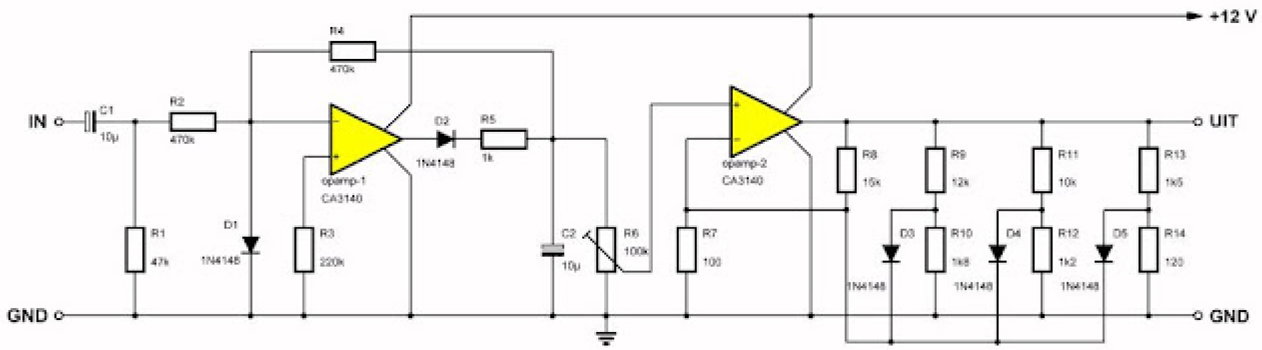
De eerste praktische schakeling

In onderstaande figuur is een praktische schakeling van het diode teruggekoppelde principe getekend. De schakeling is bedoeld om dB's lineair te meten op een analoog draaispoel metertje met een lineaire schaal van 0 dB tot +10 dB. Deze omvormer moet voorafgegaan worden door een bufferversterker met een lage uitgangsimpedantie. De schakeling levert een uitgangsspanning van 0 V bij 0 dB aan de ingang en een spanning van +10 V bij +10 dB aan de ingang. In dit schema kunt u geen silicium dioden toepassen maar germanium exemplaren. Dit is uiteraard zeer belangrijk, want Ge-dioden hebben nogal van Si afwijkende eigenschappen wat betreft de geleidingsspanning.



Een praktisch voorbeeld van een pseudo-logaritmische versterker volgens het diode teruggekoppelde principe. (© 2018 Jos Verstraten)

Een tweede voorbeeld
In de onderstaande figuur is een tweede voorbeeld getekend. Deze eenvoudige VU-meter mét gelijkrichter kunt u rechtstreeks aansluiten op een audiospanning en geeft een lineaire schaal met een bereik van -18 dB tot +4 dB. De eerste operationele versterker is geschakeld als topdetector. Deze schakeling richt de audiospanning gelijk en maakt er een positieve spanning van die terug te vinden is over de condensator C2. De tweede operationele versterker is de quasi-logaritmische versterker, waarbij drie dioden gebruikt worden om het logaritmische verband zo goed mogelijk na te bootsen. De uitgang van de schakeling levert een gelijkspanning af die u bijvoorbeeld kunt gebruiken voor het aansturen van een LED-schaal.

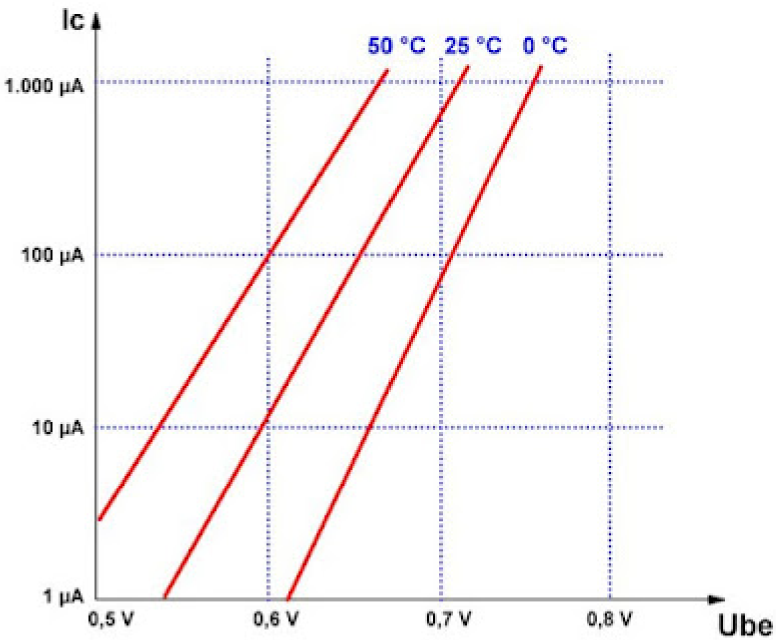


Een VU-meter met een lineaire schaal tussen -18 dB en +4 dB. (© 2018 Jos Verstraten)

De logaritmische versterker

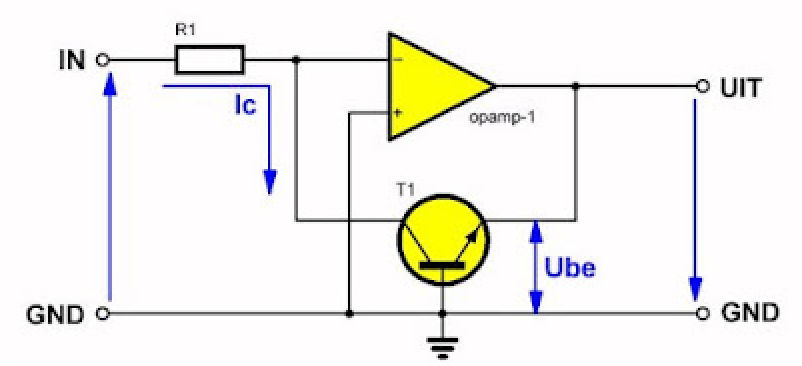
Het principe
Alle logaritmische en anti-logaritmische schakelingen werken op basis van het fysische gegeven dat het verband tussen de basis/emitter-spanning en de collectorstroom van een geleidende silicium transistor keurig logaritmisch verloopt. Dit verband is getekend in de onderstaande figuur en kan wiskundig worden uitgedrukt onder de vorm van de formule:
$U_{be} = U_t \bullet \ln [I_c / I_{lek}]$
Hierin is:

- **U_{be}**
  De basis/emitter-spanning van de geleidende transistor.
- **U_t**
  Een fysische grootheid van de halfgeleider, die tamelijk temperatuur afhankelijk is.
- **I_c**
  De collectorstroom die door de transistor vloeit.
- **I_{lek}**
  De lekstroom van de transistor, die zeer afhankelijk is van de temperatuur.



Het grafisch verband tussen U_{be} en I_c laat, als de stroom-as logaritmisch wordt ingedeeld, mooie rechte lijnen zien. (© 2018 Jos Verstraten)

De basisschakeling
Als u, zoals getekend in de onderstaande figuur, een silicium transistor opneemt in de terugkoppeling van een operationele versterker, ontstaat in theorie een ideale logaritmische versterker. De niet-inverterende ingang van de operationele versterker ligt aan de massa. Het gevolg is dat ook de inverterende ingang het massa-potentiaal opzoekt. De collector van de transistor ligt dus aan de massa. De stroom I_c hangt dan alleen af van de waarde van de ingangsspanning en van de waarde van de weerstand R1:
$I_c = U_{in} / R1$
Zoals duidelijk uit de tekening blijkt is de uitgangsspanning van de operationele versterker gelijk aan de basis/emitter-spanning van de transistor. Hieruit volgt dat u de uitgangsspanning van de schakeling kunt schrijven als:
$U_{uit} = U_t \bullet \ln [U_{in} / (R1 \bullet I_{lek})]$
De uitgangsspanning is dus gelijk aan de logaritmische waarde van de ingangsspanning.



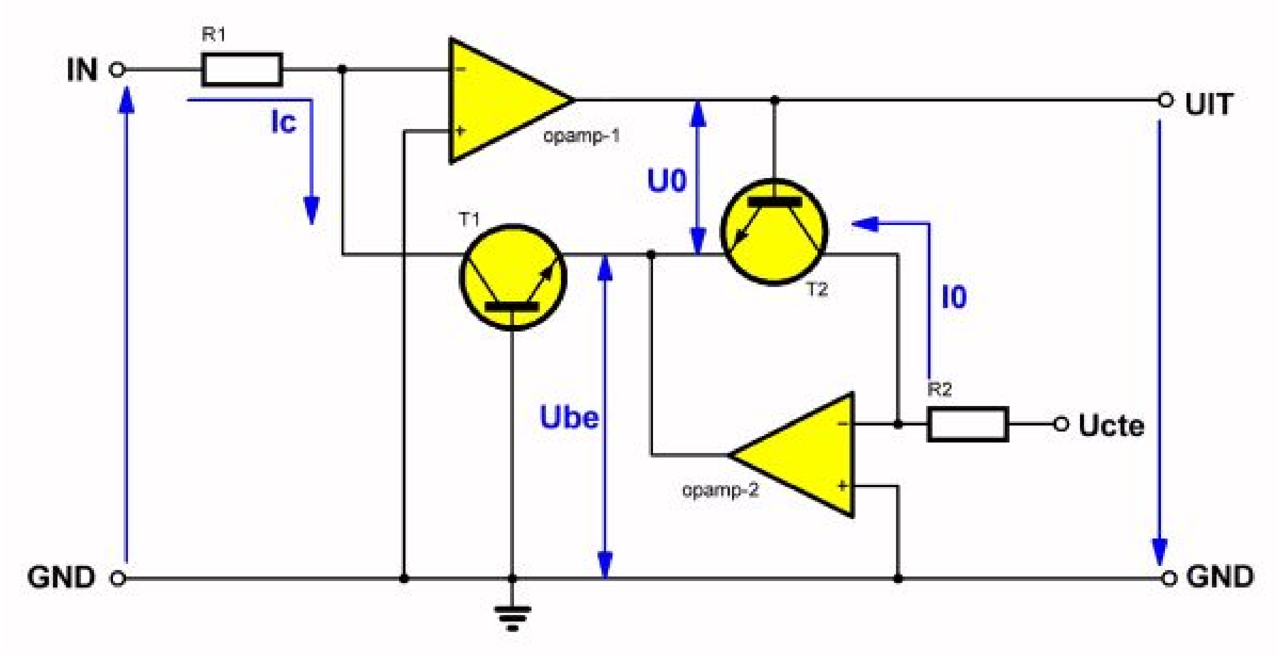
Het schema van een schakeling die in theorie een ideale logaritmische versterker zou moeten zijn. (© 2018 Jos Verstraten)

Nadelen van deze schakeling
De getekende schakeling lijkt dus een ideale logaritmische versterker, maar heeft nogal wat nadelen:

- De uitgangsspanning is zeer laag, want gelijk aan de basis/emitter-spanning van de transistor, dus gemiddeld 0,6 V.
- De variatie op de uitgangsspanning is zeer klein omdat de basis/emitter-spanning van een transistor nooit groter of kleiner kan worden dan respectievelijk 0,8 V en 0,5 V. U moet dus flink naversterken en bovendien moet u de gemiddelde waarde van U_{be} met een verschilversterker uitfilteren.
- Het grootste nadeel van de schakeling is echter dat de termen U_t en I_{lek} in de formule staan. Dit zijn twee temperatuur afhankelijke grootheden, met als gevolg dat de werking van de schakeling volledig afhankelijk is van de omgevingstemperatuur. De variatie op I_{lek} onder invloed van de temperatuur is zelfs zo groot dat de uitgangsspanning meer zal variëren onder invloed van de temperatuur dan onder invloed van variaties op de ingangsspanning!

Het is vooral deze laatste factor die de beschreven schakeling praktisch volledig onbruikbaar maakt.

De temperatuur gecompenseerde logaritmische versterker
Gelukkig kunt u aan deze extreem grote temperatuur afhankelijkheid wat doen. Het basisschema van een temperatuur gecompenseerd logaritmische versterker is getekend in de onderstaande figuur. De schakeling is in feite opgebouwd uit de combinatie van twee schakelingen volgens de voorgaande figuur. Rond IC1 zit het schema van de basisschakeling. Rond IC2 staat een identieke schakeling. De ingang van deze schakeling word echter verbonden met een constante spanning U_{cte}. De twee transistoren worden op een specifieke manier met elkaar verbonden en in deze specifieke manier zit het geheim van de temperatuur compensatie.
De uitgangsspanning van de schakeling is gelijk aan:
$U_{uit} = U_{be} - U_0$
Hierin staat U_0 voor de basis/emitter-spanning van de transistor T2. Deze spanning wordt uiteraard weer logaritmisch bepaald door de collectorstroom I_0, die op zijn beurt weer afhankelijk is van de constante spanning U_{cte}. Gaat u, via de reeds bekende formule, het verband tussen in- en uitgangsspanning berekenen, dan ontstaat de uitdrukking:
$U_{uit} = U_t \bullet \ln [I_c / I_0]$
De zeer temperatuur gevoelige factor I_{lek} is uit de formule verdwenen! De enige temperatuur afhankelijke factor is U_t maar omdat de invloed van de temperatuur hierop niet zo erg groot is kunt u deze vrij gemakkelijk compenseren.

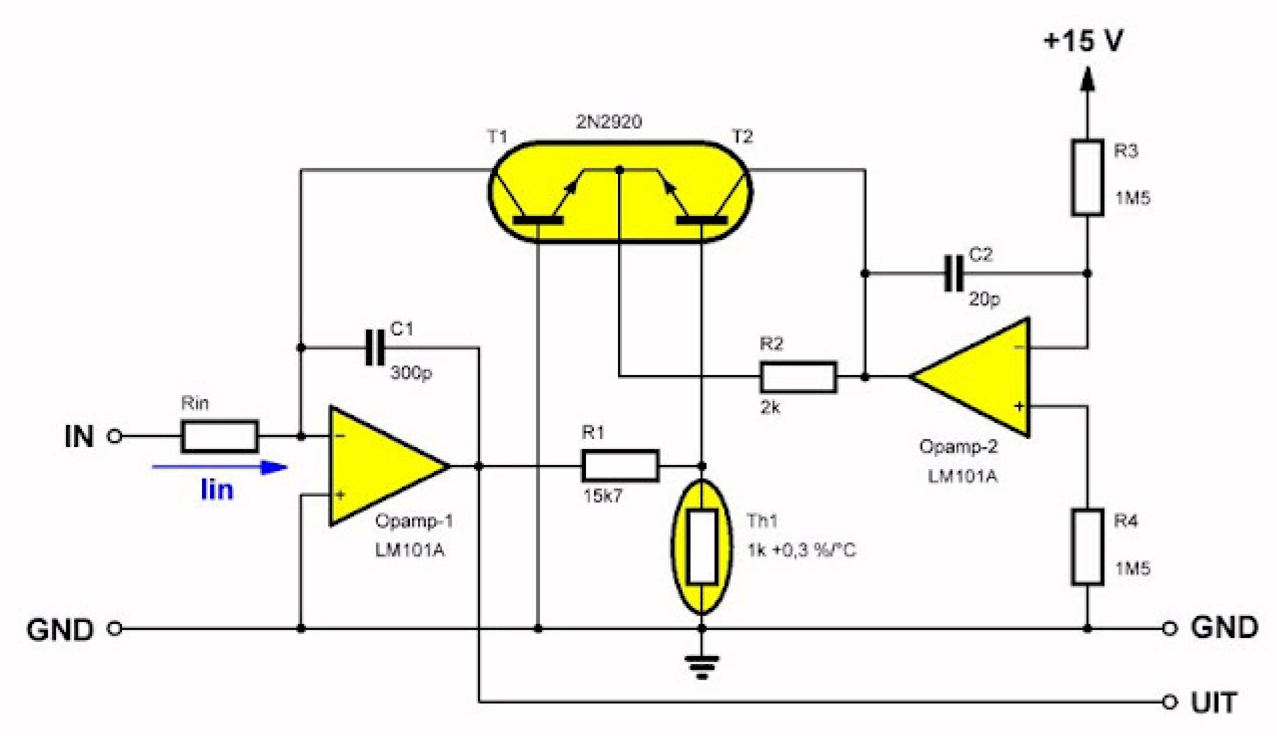


Het principiële schema van de temperatuur gecompenseerde logaritmische versterker.
(© 2018 Jos Verstraten)

Variaties op een thema
Op dit basisschema zijn talloze variaties bedacht, die allen tot functie hebben de temperatuur stabiliteit van de logaritmische versterker zo groot mogelijk te maken. Zo zal men in de meeste gevallen twee transistoren gebruiken die in een array zitten. Men is er dan zeker van dat de transistoren op dezelfde temperatuur staan en geen verschillen in I_{lek} zullen optreden. Daarnaast vinden de meeste ontwerpers het handiger de tweede schakeling te sturen met een constante stroom in plaats van met een constante spanning. De collectorstroom I_0 wordt dan niet via een weerstand afgeleid uit een spanningsbron, maar rechtstreeks geleverd door een stroombron.
Door tussen de emitters van de twee transistoren een weerstand op te nemen probeert men de lineariteit over een zo breed mogelijk gebied van de ingangsspanning te handhaven. De temperatuurscoëfficiënt van U_t wordt soms opgevangen door in de schakeling een thermistor of NTC op te nemen.

Praktische voorbeeld schakelingen

Trouw aan de principiële schakeling
De eerste voorbeeld schakeling die wordt besproken volgt het theoretische schema wel heel letterlijk op de voet. De schakeling is getekend in onderstaande figuur en werd ontwikkeld door NatSemi. De schakeling zet een ingangsstroom tussen 10 nA en 1 mA om in een uitgangsspanning met een omzettingsfactor van 1 V per decade. Als de ingangsstroom vertienvoudigt, zal de uitgangsspanning met 1 V stijgen. Voor de twee transistoren wordt een 2N2920 gebruikt, een dubbele transistor in één behuizing die meer dan € 15,00 kost. De temperatuurscoëfficiënt van U_t wordt gecompenseerd door de thermistor Th1, die een tempco van +0,3 %/°C moet hebben. De weerstand R3 moet verbonden worden met een zeer stabiele voedingsspanning van +15 V. De waarde van deze weerstand bepaalt de waarde van de ingangsstroom, waarbij de uitgangsspanning gelijk is aan 0 V. Met de ingetekende waarde gebeurt dit bij een ingangsstroom van 10 µA.

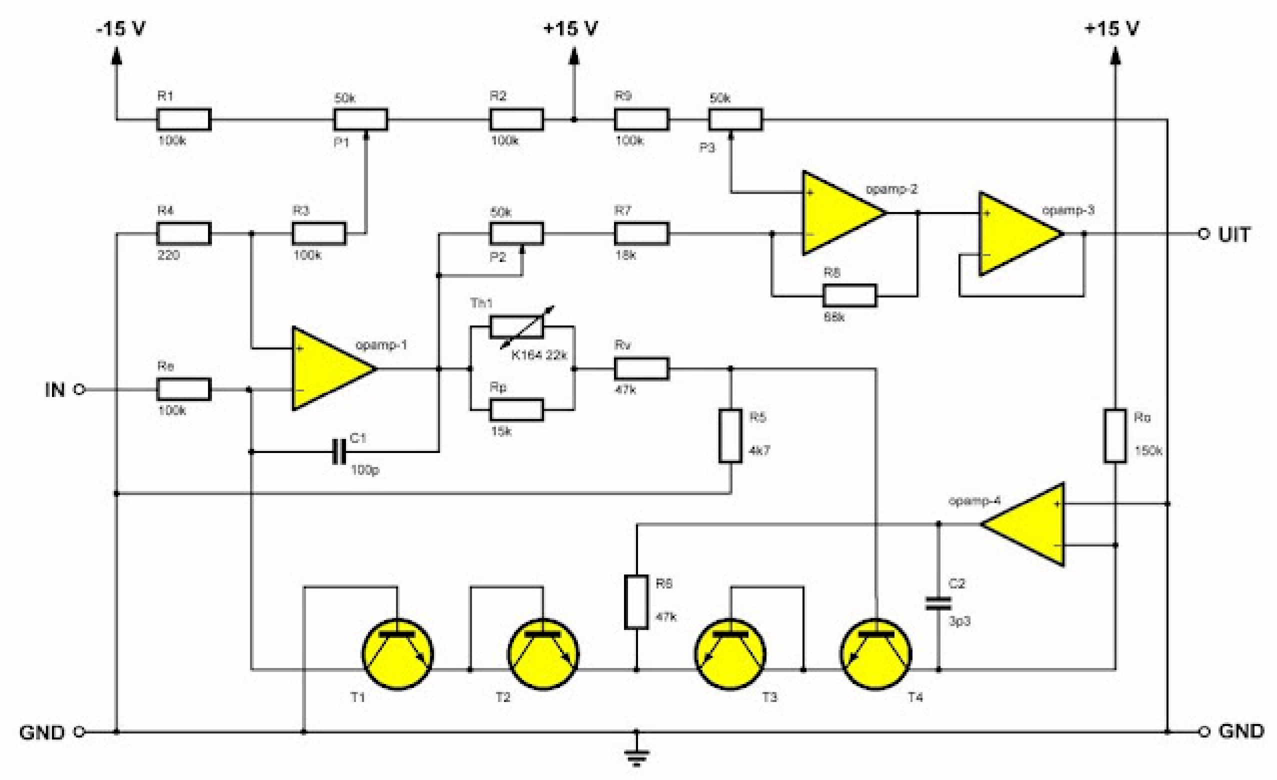


Een logaritmische versterker die een ingangsstroom omzet in een logaritmische uitgangsspanning. (© 2018 Jos Verstraten)

Meetversterker met een bereik van 60 dB

In de onderstaande figuur is een logaritmische versterker getekend, die aan zeer hoge eisen voldoet. De schakeling heeft een dynamisch bereik van niet minder dan 60 dB, wat er op neer komt dat de ingangsspanning mag variëren tussen 10 mV en 10 V. De uitgangsspanning varieert dan tussen 0 V en +10 V. De schakeling is dus ideaal voor het maken van een digitale dB-meter, waarbij overigens een resolutie van 0,1 V meer dan genoeg is. De meetresolutie bedraagt dan nog steeds 1 dB, hetgeen realistisch te noemen is als u bedenkt dat de schakeling een fout van maximaal ±0,2 dB heeft over een temperatuurbereik van +10 °C tot +45 °C. Als u de uitlezing een resolutie geeft van 0,01 V, dan kunt u in principe tot 0,1 dB nauwkeurig meten. Maar dat heeft, gelet op de mogelijke onnauwkeurigheid van 0,2 dB, weinig zin!

De +10 V uitgangsspanning van de schakeling moet dan uiteraard door middel van een weerstandsdelertje gereduceerd worden tot +6 V, zodat de schaalfactor van de meter 10 dB/V bedraagt. De vier operationele versterkers TL084 zitten in één IC. Hetzelfde geldt voor de vier transistoren die in deze schakeling gebruikt worden. Daarvoor gebruikt men het beroemde array CA3086.



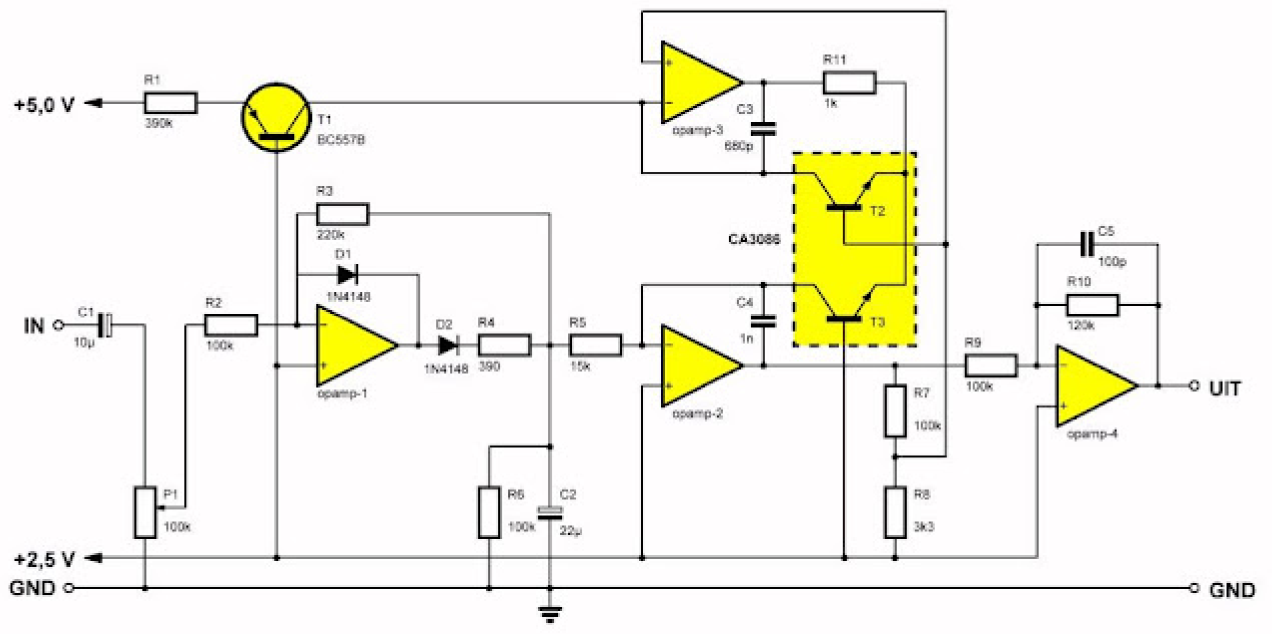
Een schakeling van een logaritmische versterker, waarmee u een digitale dB-meter kunt maken met een bereik van 60 dB. (© 2018 Jos Verstraten)

Afregelen van de schakeling

Voor het afregelen van de schakeling hebt u een nauwkeurige gelijkspanningsbron nodig, waarvan u spanningen van +10 V, +1 V, +100 mV en +10 mV kunt aftakken. Op de uitgang van de schakeling wordt een digitale gelijkspanningsmeter aangesloten. U zet afwisselend +10 V en +1 V op de ingang en regelt de instelpotentiometers P2 en P3 zo af, dat uitgangsspanningen van respectievelijk +10 V en +8 V gemeten worden. Deze afregeling moet u stap voor stap moeten uitvoeren, waarbij steeds voorzichtig naar de twee waarden wordt toegewerkt. Nadien legt u spanningen van +100 mV en +10 mV aan en regelt P1 af op de best mogelijke lineariteit.

VU-meter met lineaire schaal van 60 dB

Tot slot wordt in de onderstaande figuur een logaritmische versterker getekend met een dynamisch bereik van 60 dB. Hetzelfde bereik dus als de vorige schakeling. Maar omdat het de bedoeling is dat u de schakeling gebruikt als VU-meter met een LED-schaal als uitlezing moeten er aan de nauwkeurigheid niet zo'n hoge eisen gesteld worden. De schakeling is dan ook veel eenvoudiger van opzet. De eerste operationele versterker opamp-1 vormt de gelijkrichter, die de audiospanning omzet in een mooie gelijkspanning over de condensator C2. De operationele versterkers opamp-2 en opamp-3 vormen, samen met de transistoren T2 en T3, de feitelijke logaritmische versterker. De laatste operationele versterker opamp-4 vormt een uitgangsversterker, waarmee u de uitgangsspanning van de logaritmische versterker kunt aanpassen aan de gevoeligheid van de LED-meter. Ook nu wordt een CA3086 gebruikt om de temperatuur stabiliteit van de schakeling te optimaliseren. De temperatuurscoëfficiënt van de logaritmische versterker wordt verder niet gecompenseerd, omdat dit voor het beoogde doel niet noodzakelijk is. Als op-amp's kunt u de CA3140 toepassen.



Een gelijkrichter plus logaritmische versterker voor een lineaire VU-meter met een bereik van 60 dB.
(© 2018 Jos Verstraten)